

СДВИГОВАЯ ПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ БЕЗУДАРНОМ СЖАТИИ

Ю. В. Батьков, В. Н. Князев, С. А. Новиков,
В. А. Раевский, Н. Д. Фишман

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Проведены эксперименты по определению динамического предела текучести алюминия марки АД-1 при безударном нагружении методом главных напряжений. Полученные результаты свидетельствуют о повышении предела текучести при безударном нагружении по сравнению с ударным.

Одной из основных задач физики высоких давлений является определение физико-механических характеристик веществ. Сдвиговая прочность материала, характеризующая динамическим пределом текучести, наряду со сжимаемостью, упругостью и вязкостью является одним из основных реологических свойств твердого тела. Исследование поведения динамического предела текучести имеет большое значение при создании физически обоснованных моделей прочности материалов. Значительный объем исследований посвящен измерениям прочности материалов в условиях ударно-волнового нагружения [1–7]. Но для создания широкодиапазонных моделей прочности необходимы исследования свойств веществ при различных режимах нагружения, в которых реализуются различные соотношения определяющих параметров — давления, величины и скорости деформации, температуры. При этом, как показывают эксперименты, реакция материалов носит сложный, сугубо индивидуальный характер.

В свете современных представлений о механизме высокоскоростной пластической деформации динамический предел Y_g текучести является возрастающей функцией деформации, ее скорости, давления и убывающей функцией температуры [8]. Однако недавно сотрудниками Сандийской национальной лаборатории в экспериментах по определению предела текучести алюминия и вольфрама при безударном нагружении получены данные, свидетельствующие, что динамический предел текучести является немонотонной функцией скорости деформации при прочих фиксированных параметрах пластической деформации [9]. Этот эффект нельзя объяснить разогревом вещества в

ударной волне, так как в экспериментах, проведенных американскими учеными, разогрев материала при безударном и ударном нагружении практически одинаков. Это противоречит общепринятым представлениям о поведении материалов при интенсивных динамических нагрузках. Возможной причиной снижения прочности при увеличении скорости деформации предполагается появление полос сдвига вследствие сильного гетерогенного разогрева вещества на границах зерен [10] или, возможно, в силу рекристаллизации материала [11].

В данной работе представлены результаты первых экспериментов по исследованию сдвиговой прочности алюминия марки АД-1 при безударном сжатии методом измерения главных напряжений. Ранее этот метод применялся для определения динамического предела текучести при ударно-волновом нагружении [1, 2, 4]. Ранее было предложено несколько схем безударного сжатия [12, 13] и схема организации ступенчатого сжатия путем разбиения ударной волны на ряд последовательно действующих ударных волн с меньшими амплитудами (многократное ударное сжатие) [14]. Но, как правило, экспериментальные исследования ограничивались получением данных лишь о сжимаемости веществ.

В ходе работы выбрана схема взрывного нагружающего устройства со сжатием образца продуктами детонации через воздушный зазор (рис. 1). Проведенные расчеты свидетельствуют об отсутствии влияния воздуха в зазоре на напряженно-деформированное состояние в образце. На основании расчетов выбрана величина зазора между шашкой взрывчатого вещества и образцом. Из рис. 2 видно, что безударный темп нагружения реализует-

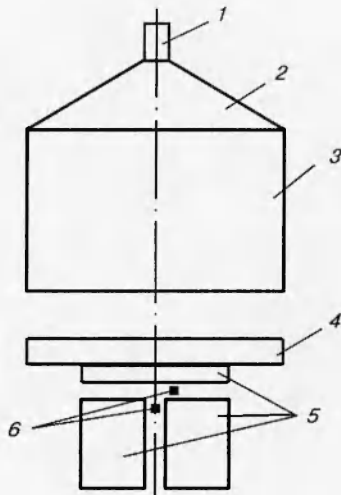


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — электродетонатор, 2 — линза (ГДВ),
3 — шашка взрывчатого вещества, 4 —
экран, 5 — элементы образца, 6 — датчики

ся при величине зазора 25 мм, скорость деформации при этом составляет $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$. При распространении волны вглубь образца происходят изменение темпа нагружения и в дальнейшем трансформация волны сжатия в ударную. На основании расчетов выбрана плоскость установки датчиков. Результаты расчетов сопоставлены с данными экспериментов (см. рис. 2). Расчетный разогрев образца в области расположения датчиков составляет $\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ при безударном нагружении и $\approx 150 \div 170 \text{ }^\circ\text{C}$ — при ударном нагружении. В расчетах в качестве уравнения состояния для алюминия использовалось уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена для конденсированных веществ [15]:

$$p = p_x + p_T,$$

$$E = E_x + E_T,$$

$$p_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1),$$

$$p_T = \rho \Gamma E_T,$$

где p_x , E_x — потенциальные («холодные») составляющие давления и энергии; p_T , E_T — тепловые составляющие; ρ_0 , c_0 — начальные плотность и скорость звука; n — показатель политропы, δ — сжатие; Γ — коэффициент Грюнайзена. Для взрывчатого вещества применялось упрощенное двухфазное уравнение состояния «взрывчатое вещество — продукты взрыва» В. Н. Зубарева [16].

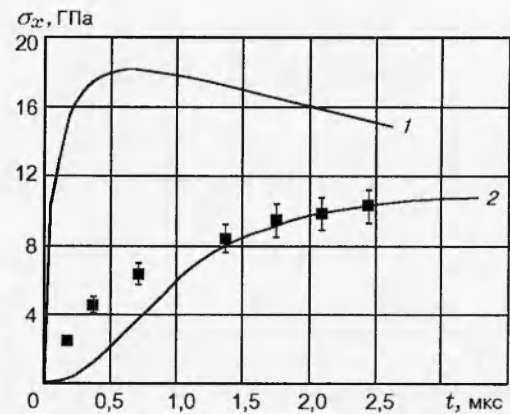


Рис. 2. Результаты расчетов и экспериментов:

расчет: 1 — ударное нагружение, зазор 5 мм,
2 — безударное нагружение, зазор 25 мм; точки — эксперимент (безударное нагружение)

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование сдвиговой прочности проводилось методом измерения главных напряжений — продольного σ_x и поперечного σ_y — с помощью проволочных манганиновых датчиков [4]. Схема постановки эксперимента приведена на рис. 1. Датчики помещались в узких (0,4 мм) плоских щелях образца, ориентированных параллельно и перпендикулярно по отношению к направлению распространения волны. В результате циркуляции волн в щели, перпендикулярной направлению распространения, устанавливается давление, равное σ_x , а в щели, совпадающей с направлением распространения волны, — давление, равное σ_y . Напряжения регистрировались датчиками П-образной формы из манганиновой проволоки диаметром 0,05 мм [2, 4]. Датчик помещали в тонкую изолирующую среду (лавсан). Суммарная толщина датчиков, включая слои изоляции, равнялась 0,4 мм. Длина чувствительного элемента датчиков 10 мм. Относительная погрешность измерений главных напряжений не более 10%. опыты проводили на образцах диаметром 60 и толщиной 30 мм.

Ширина фронта волны при величине зазора между шашкой взрывчатого вещества и образцом 25 мм составляла ≈ 2 мкс. Длительность стационарного течения за фронтом волны равнялась ≈ 2 мкс, чего достаточно для надежной регистрации значений σ_x и σ_y в стационарном режиме течения. Полученные в опытах

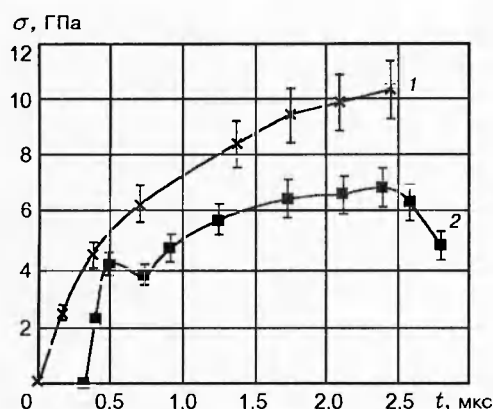


Рис. 3. Обработанные осциллограммы экспериментов:

1 — продольное напряжение σ_x , 2 — поперечное σ_y

значения σ_x в пределах погрешности совпадают с σ_x , вычисленными при решении задачи, моделирующей данный процесс в гидродинамическом приближении (см. рис. 2). Зависимости $\sigma(t)$, полученные после обработки осциллограмм экспериментов, приведены на рис. 3. При вычислении предела текучести учитывалось взаимное расположение датчиков. Показания датчика, регистрирующего σ_y , путем перерасчета смещались по времени к показаниям датчика, регистрирующего σ_x .

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты измерений главных напряжений σ_x и σ_y позволяют без дополнительной информации вычислить динамический предел текучести $Y_g = \sigma_x - \sigma_y$. Результаты вычислений приведены в таблице. Там же для сравнения приведены значения Y_g для соответствующих напряжений при ударно-волновом напряжении [1, 2]. На рис. 4 нанесены экспериментальные точки для алюминия АД-1, полученные в данной работе, при безударном сжатии; экспериментальные точки при ударно-волновом нагружении для алюминия АД-1 и сплавов алю-

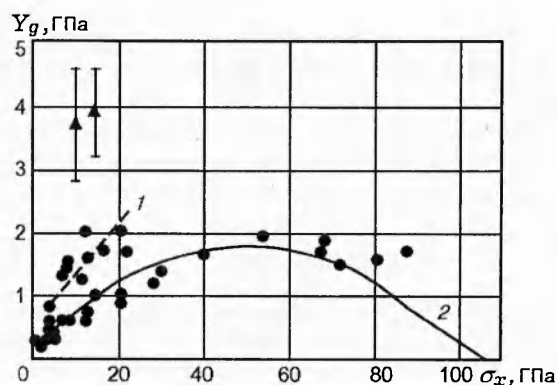


Рис. 4. Результаты вычислений предела текучести:

эксперимент: \blacklozenge — ударное нагружение, данные [1-7], \blacktriangle — безударное, данные авторов; 1 — статистическая прямая, 2 — аналитическая кривая

миния, взятые из работ [1-7]; аналитическая кривая зависимости предела текучести от нормального напряжения [4], с достаточной степенью точности описывающая экспериментальные точки при ударном нагружении, а также линейная зависимость динамического предела текучести для АД-1:

$$Y_g = (0,082 \pm 0,015)\sigma_x + (0,495 \pm 0,177) \text{ [ГПа]},$$

полученная при статистической обработке результатов экспериментов [2, 4] по ударному нагружению. Из рисунка видно, что величина динамического предела текучести алюминия при безударном сжатии примерно в два раза выше значения предела текучести, установленного тем же методом при ударно-волновом нагружении, и качественно согласуется с результатами работы [9]. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что при увеличении скорости деформации алюминия в волне сжатия ($\dot{\epsilon} > 10^6 \text{ с}^{-1}$) происходит его разупрочнение. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего экспериментального изучения свойств материалов при различных режимах

Результаты экспериментов

Номер опыта	Взрывчатое вещество	σ_x , ГПа	σ_y , ГПа	Y_g , ГПа	
				безударное	ударное
1	ТНТ	$10,2 \pm 0,7$	$6,5 \pm 0,6$	$3,7 \pm 0,9$	$1,3 \pm 0,3$
2	ТГ 30/70	$14,8 \pm 0,7$	$10,9 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,7$	$1,7 \pm 0,4$

нагрузки, совершенствования существующих и построения новых физических моделей прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-01-00344).

ЛИТЕРАТУРА

1. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Синицина Л. М. и др. Исследование сдвиговых напряжений в металлах на фронте ударной волны // Проблемы прочности. 1981. № 5. С. 56–59.
2. Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126–132.
3. Альтшулер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. С. Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1971. № 6. С. 159–167.
4. Батьков Ю. В., Глушак А. Б., Глушак Б. Л. и др. Исследование напряженного состояния ударно-сжатых твердых тел методом главных напряжений // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 114–120.
5. Новиков С. А., Синицина Л. М. О влиянии давления ударного сжатия на величины критических напряжений сдвига // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1970. № 6. С. 107–110.
6. Morris G., Fritz J., Hollian B. Quasi-elastic high-pressure waves in Al-2024 and copper // Shok Waves in Condensed Matter. New York, 1982.
7. Павловский М. Н., Степанюк В. С., Комиссаров В. В. Сдвиговая прочность свинца, олова, меди, алюминия, корунда и фторопласта-4 за фронтом ударных волн // Проблемы прочности. 1991. № 10. С. 50–54.
8. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982.
9. Asay J. R. The use of shock-structure methods for evaluating high-pressure material properties // Impact Eng. 1997. V. 20. P. 27–61.
10. Мосс Дж. Л. Влияние ударных волн на величину, скорость и температуру деформаций в адиабатических полосах сдвига // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. Г. Н. Эпштейна. М.: Металлургия, 1984.
11. Атрошенко С. А., Мещеряков Ю. И., Нестерова Е. В. и др. О динамической рекристаллизации в полосах локализованного сдвига, инициированных ударным нагружением // Физика металлов и металловедение. 1993. Т. 75, № 4. С. 136–150.
12. Могилевский М. А., Бордзиловский С. А., Горшков Н. Н. Влияние ширины фронта при квазиизэнтропическом сжатии на упрочение некоторых металлов // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 6. С. 110–114.
13. Ададуров Г. А., Гольданский В. И. Получение низкотемпературных состояний конденсированных веществ при динамическом сжатии // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики / Под ред. А. П. Александрова. Л.: Наука, 1984.
14. Ямпольский П. А. Изэнтропическое сжатие при помощи ударных волн // Вестн. АН СССР. 1975. № 4. С. 42–50.
15. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Чельшев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
16. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 114–126.

Поступила в редакцию 22/XII 1998 г.